



УДК 624.012.04-52
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-1-4-16

*Научная статья*



# Повышение прочности и жесткости железобетонных внецентренно сжатых элементов углепластиковым армированием

**С. В. Георгиев** ✉, **Д. Р. Маилян**

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ sergey.georgiev@bk.ru

**Аннотация**

***Введение.*** Существующие методы усиления железобетонных конструкций очень дорогостоящие и трудоёмкие. Разработка новых систем усиления, позволяющих снизить сроки производства работ и их стоимость, является делом перспективным и актуальным. Современные методы усиления, в основе которых лежат композитные материалы, являются недостаточно изученными в России. Особенно это касается поведения композитных материалов в железобетонных конструкциях. Отсутствие таких исследований приводит к перерасходу материалов и увеличению стоимости работ по усилению конструкций. Целью данной работы является изучение относительных деформаций композитных материалов, расположенных в продольном и поперечном направлении, при работе внецентренно сжатых гибких железобетонных стоек.

***Материалы и методы.*** В качестве материальной базы выступают результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности внецентренно сжатых железобетонных стоек, усиленных различными вариантами композитного внешнего армирования. В наиболее нагруженных зонах композитного усиления наклеивались тензодатчики с базой 2 см, улавливающие изменение относительных деформаций до 0,001 мм. Всего в анализе были использованы результаты работы пяти стоек. В процессе эксперимента определялись прогибы и относительные деформации бетона и композитных материалов.

***Результаты исследования.*** В результате проведённых экспериментальных исследований были получены относительные деформации композитных материалов в продольном и поперечном направлении. Измерения проводились при ступенчато возрастающей нагрузке, равной 10 % от разрушающей. На основании полученных данных были построены графики зависимости изменения относительных деформаций от уровней нагрузки для каждого испытанного образца. Помимо показаний тензодатчиков, получены и графически представлены прогибы опытных образцов в процессе испытаний.

***Обсуждение и заключения.*** Полученные экспериментальные данные по прогибам и относительным деформациям в композитных материалах позволили определить зоны наиболее и наименее напряжённых участков композитного усиления. На основе анализа этих данных были сделаны выводы о разработке новых схем усиления, позволяющих существенно сэкономить объём используемых композитных материалов без уменьшения их эффективности.

**Ключевые слова:** бетон, железобетон, сталь, углепластик, композитная арматура, усиление, деформации, напряжение.

**Благодарности.** Авторы благодарят руководителей ООО «НЦК» за предоставленные материалы.

**Для цитирования.** Георгиев, С. В. Повышение прочности и жесткости железобетонных внецентренно сжатых элементов углепластиковым армированием / С. В. Георгиев, Д. Р. Маилян // Современные тенденции в

строительстве, градостроительстве и планировке территорий. — 2022. — Т. 1, № 1. — С. 4–16. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-1-4-16

*Original article*

# Increasing the Strength and Rigidity of Reinforced Concrete Eccentrically Compressed Elements with Carbon Fiber Reinforcement

**Sergey V. Georgiev** ✉, **Dmitry R. Mailyan**

Don State Technical University, Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ sergey.georgiev@bk.ru

**Abstract**

***Introduction.*** Existing methods of reinforced concrete structures strengthening are very expensive and time-consuming. The development of new strengthening systems allowing to reduce time and cost of works is perspective and relevant task. Modern methods of strengthening with composite materials are insufficiently studied in Russia. Particularly if the behavior of composite materials in the reinforced concrete structures is concerned. The lack of research in this area leads to the overrun of materials and increase in the cost of structures' strengthening. The aim of this work is to study the relative deformations of composite materials in the longitudinal and transverse directions during the operation of eccentrically compressed flexible reinforced concrete poles.

***Materials and methods.*** The factual basis for the research are the results of experimental studies of the strength and deformability of eccentrically compressed reinforced concrete poles, strengthened with various types of composite external reinforcement. In the most loaded zones of the composite reinforcement, the 2 cm-long strain gauges were glued, capable of detecting changes in relative deformations up to 0.001 mm. In total, the results of operation of 5 poles were used in the analysis. During the experiment, deflections and relative deformations of concrete and composite materials were determined.

***Results.*** In the result of experimental studies, relative deformations of composite materials in the longitudinal and transverse directions were obtained. The measurements were carried out at a stepwise increasing load equal to 10 % of the breaking load. Based on the data obtained, graphs of the dependence of the change in relative deformations on the load levels were plotted for each tested sample. In addition to the readings of strain gauges, deflections of tested samples were obtained during testing and graphically presented.

***Discussion and Conclusions.*** The obtained experimental data on deflections and relative deformations in composite materials made it possible to determine the zones of the most and least strained sections of the composite reinforcement. Based on the analysis of these data, conclusions were drawn about the development of new strengthening systems that can significantly save the amount of composite materials used without reducing their efficiency.

**Keywords:** concrete, reinforced concrete, steel, carbon fiber, composite reinforcement, strengthening, deformations, strain.

**Acknowledgements.** The authors would like to thank the heads of "NCK" LLC for the provided materials.

**For citation.** S.V. Georgiev, D.R. Mailyan. Increasing the strength and rigidity of reinforced concrete eccentrically compressed elements with carbon fiber reinforcement. Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning, 2022, vol. 1, no. 1, pp. 4–16. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-1-4-16

**Введение.** Использование в современном строительстве железобетона для изготовления несущих конструкций наиболее рационально в связи с распространенностью исходных материалов, его дешевизной и долговечностью [1–4].

Соединения бетона и металла позволяют создавать конструкции высокой прочности и эффективности, по сравнению с металлическими и деревянными несущими конструкциями.

Железобетонные конструкции в нормальных условиях, без температурных перепадов, неблагоприятного влияния окружающей среды и т. д. способны сохранять свою прочность до 100 лет.

Однако при воздействии агрессивной среды или иных факторов целостность и, соответственно, долговечность конструкций существенно снижаются [5].

В аварийных ситуациях перед инженерами встает выбор: или замена конструкции (сооружения) в целом, или восстановление ее несущей способности. На выбор влияют в основном экономические показатели, которые зависят от стоимости материалов и работ по усилению (возведению) конструкций, доставки и аренды опалубки и др.

Наиболее уязвимы конструкции, расположенные в зонах воздействия агрессивных производственных процессов или негативных атмосферных факторов [6]. Из известных способов усиления железобетонных конструкций наиболее популярными являются методы, основанные на использовании железобетона или металла [7–9]. Однако подобные методы усиления несмотря на свою достаточно высокую эффективность и низкую стоимость материалов отличаются высокой трудоемкостью и сложностью, вследствие чего не являются перспективными [10, 11].

Из-за особенности работы гибких внецентренно сжатых конструкций описанные выше методы усиления не всегда дают существенный прирост прочности, особенно когда на конструкцию наложены требования по предельным прогибам [12].

В последнее время наиболее эффективным и дешевым методом для усиления растянутой зоны железобетонных конструкций (особенно для изгибаемых элементов) считается наклеивание композитных материалов, основанных на углепластиках [13–15].

В России композитные системы усиления в строительстве только начинают массово использоваться. Однако высокая стоимость материалов и немногочисленные научные исследования в этой области не позволяют в полной мере решить проблемы усиления железобетонных конструкций композитными материалами и полностью вытеснить традиционные методы. Особенно это касается сжатых элементов с высокой гибкостью и работающих при больших суммарных эксцентриситетах приложения нагрузки.

В области проектирования сжатых элементов самыми малоэффективными являются гибкие образцы, работающие при больших эксцентриситетах приложения нагрузки [16, 17]. Подобные конструкции рассчитываются по балочной схеме, к тому же к ним часто предъявляются требования по прогибам, ограничивающие предельную прочность конструкций. Для сжатых железобетонных элементов требования по предельным прогибам обосновываются в основном технологическими причинами. Наиболее жёсткие ограничения по предельным прогибам выдвигаются для четырех категорий сжатых железобетонных колонн. Ниже приведены основные требования к предельным прогибам и описание конструкций, на которые введены ограничения.

В многоэтажных зданиях железобетонные сжатые панели, шарнирно закрепленные с перекрытием, ограничиваются по предельным прогибам величиной $h$ / 300, при этом подразумевается податливое соединение перекрытия и сжатого элемента.

Элементы конструкции фахверка ограничиваются по предельным прогибам $l$ / 200, что является конструктивным мероприятием.

Опоры конвейерных галерей ограничиваются по предельным прогибам величиной $h$ / 250. Это ограничение связано с технологической необходимостью работы конвейерных галерей.

Наиболее жесткие требования предъявляются к конструкциям промышленных зданий с мостовыми кранами. В зависимости от режима работы крана предельные прогибы ограничиваются согласно данным таблицы Д.3 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», однако эти ограничения не должны быть меньше 6 мм.

Все перечисленные выше конструкции в большинстве своём работают на внецентренное сжатие при малых эксцентриситетах приложения нагрузки. Такие ограничения существенно занижают предельную нагрузку на проектируемую конструкцию.

Для решения данной проблемы были спроектированы, изготовлены, усилены и испытаны гибкие железобетонные конструкции, работающие с малыми эксцентриситетами приложения нагрузки. В процессе эксперимента были зафиксированы предельные прочности и уровни нагрузки при предельных нормативных прогибах.

Основные цели научного исследования:

– определение наиболее эффективных вариантов усиления железобетонных конструкций композитными материалами с характеристиками, выходящими за ограничения СП 164.1325800.2014 по предельной гибкости и эксцентриситету приложения нагрузки;

– определение наиболее нагруженных зон композитного усиления согласно показаниям тензодатчиков, наклеенных на углепластиковых ламелях или на углеткани;

– определение влияния внешнего композитного усиления на увеличение несущей способности внецентренно сжатых железобетонных конструкций, на которые накладываются требования по ограничению предельных прогибов согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

Для достижения поставленных целей были выполнены следующие действия:

– изготовлены, усилены и испытаны железобетонные стойки;

– в процессе испытания были замечены относительные деформации в композитных материалах и на основе полученных данных были построены графики изменения деформаций по отношению к уровню нагрузки;

– проанализированы показания всех тензодатчиков с целью выявления наиболее эффективных зон композитного усиления;

– разработаны предложения по эффективному усилению композитными материалами гибких внецентренно сжатых железобетонных конструкций.

**Материалы и методы.** В качестве материалов исследования были взяты результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности железобетонных стоек.

Железобетонные опытные образцы имели различные варианты композитного усиления, результаты испытаний которых сравнивались со значениями эталонного, неусиленного, образца.

Железобетонные стойки имели следующие габариты: высота сечения — 12,5 см, ширина — 25 см, длина — 240 см. При таких габаритах гибкость железобетонных конструкций составляла $\lambda_h = 20$. Все опытные образцы испытывались при эксцентриситете приложения нагрузки $e_0 = 4$ см (0,32 h).

Прочность бетона на сжатие определялась согласно результатам испытания серии бетонных кубов гранью 15 см, значение которых приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытания опытных образцов

| № п/п | Шифр стоек | Класс бетона – $B$ | Прочность, кН $N_s; N_{s,f}$ | Прогибы, $f^{exp}$,мм | Прочность при прогибе, кН | | | | Коэффициенты усиления | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 6 мм | 8 мм | 9,6 мм | 12 мм | $k_1$ | $k_2$ | $k_3$ | $k_4$ | $k_5$ |
| 1 | БГ | 30,6 | 410 | 20,5 | 160 | 215 | 260 | 320 | — | — | — | — | — |
| 2 | БГУ-$X_1$ | 30,0 | 400 | 15,2 | 170 | 215 | 260 | 320 | 0,98 | 1,06 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 3 | БГУ-$X_2$ | 31,2 | 450 | 28,1 | 240 | 290 | 340 | 400 | 1,10 | 1,50 | 1,35 | 1,31 | 1,25 |
| 4 | БГУ-$X_5$ | 35,7 | 510 | 15,5 | 350 | 425 | 470 | 530 | 1,24 | 2,19 | 1,98 | 1,81 | 1,66 |
| 5 | БГУ-$X_2L_p$ | 31,2 | 510 | 34,2 | 200 | 250 | 280 | 350 | 1,24 | 1,25 | 1,16 | 1,08 | 1,09 |
| 6 | БГУ-$X_3L_p$ | 39,8 | 714,5 | 24,7 | 340 | 400 | 450 | 530 | 1,74 | 2,13 | 1,86 | 1,73 | 1,66 |

Примечания:

1. В столбцах 6–9 приведены данные о прочности конструкций при предельных прогибах для колонн промышленных одноэтажных зданий с мостовыми кранами, кН l / 500–l /2500 ≥ 6 мм; железобетонных панелей с податливым соединением, кН h / 300 = 2400 / 300 = 8 мм; опор конвейерных галерей, кН l / 250 = 2400 / 250 = 9,6 мм; стоек фахверковых систем, кН l / 200 = 2400 / 200 = 12 мм.

2. В столбцах 10–14 приведены коэффициенты усиления при предельной прочности образцов $f_1$; при предельном прогибе, равном 6 мм, для колонн промышленных зданий $f_2$; для железобетонных панелей с податливым соединением $f_3$; опор конвейерных галерей $f_4$ и стоек фахверковых систем $f_5$.

Внутреннее продольное армирование принималось приблизительно в 1,5 % от общей площади бетона и состояло из четырех стержней диаметром 12А500. Поперечное внутреннее армирование состояло из металлических хомутов из арматуры класса В500 диаметром 6 мм. На приборных участках для предотвращения смятия конструкций устанавливался ряд металлических сеток. Защитный слой бетона для продольной арматуры составлял 2,5 см. Все опытные образцы испытывались при ступенчато возрастающей нагрузке этапами, приблизительно равными 5–10 % от максимальной.

Усиленные опытные образцы имели разные варианты композитного армирования, фото их представлены на рис. 1, а описание — в примечании к таблице 1.

В процессе эксперимента измерялись относительные деформации в наиболее нагруженных зонах композитного усиления, схемы расположения тензодатчиков представлены для каждой конструкции на рисунках. Графики изменения относительных деформаций композитных материалов по отношению к уровню нагрузки представлены на тех же рисунках справа.

**Результаты исследования**. В таблице 1 представлены основные характеристики опытных образцов и результаты испытаний. На рис. 2, 3 даны графики изменения прогибов опытных образцов при изменении уровня нагрузки (слева) и относительном уровне нагрузки $N / N_{ult}$ (справа) и графики изменения коэффициентов усиления при предельно допустимых прогибах опытных образцов. На рис. 4–8 приведены схемы установки тензодатчиков на композитных материалах в наиболее нагруженных зонах (слева на рисунках) и графики изменения относительных деформаций по отношению к уровню нагрузки (справа на рисунках).

Для каждого образца представлено описание результатов изменения относительных деформаций в композитных материалах и поведение стойки в целом.

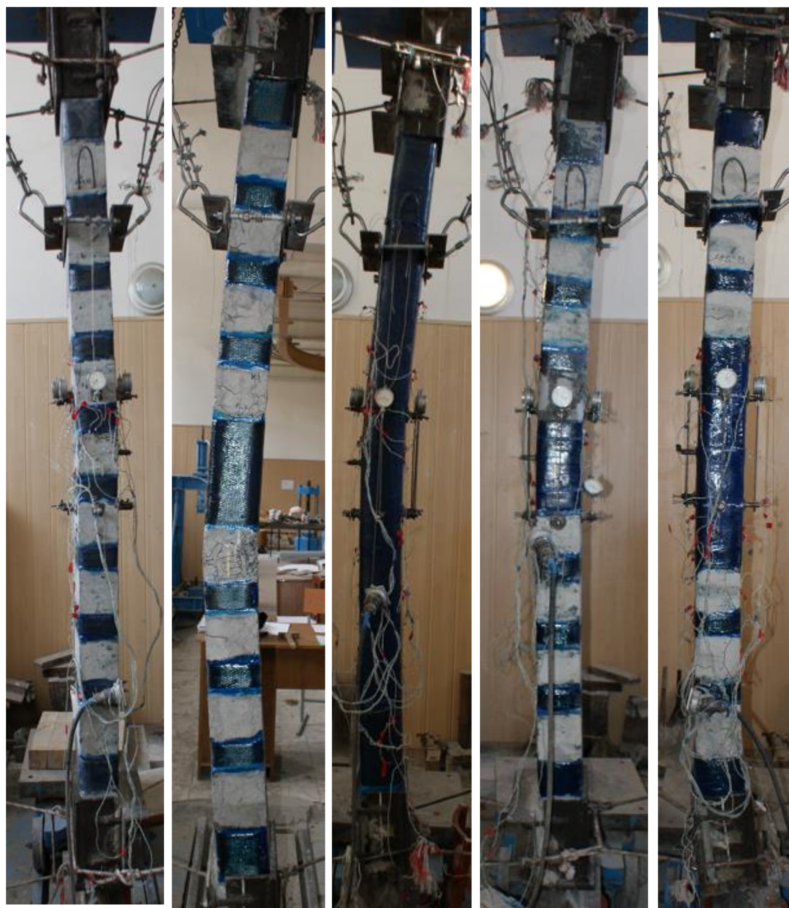


Рис. 1. Характер разрушения усиленных образцов (фото авторов)

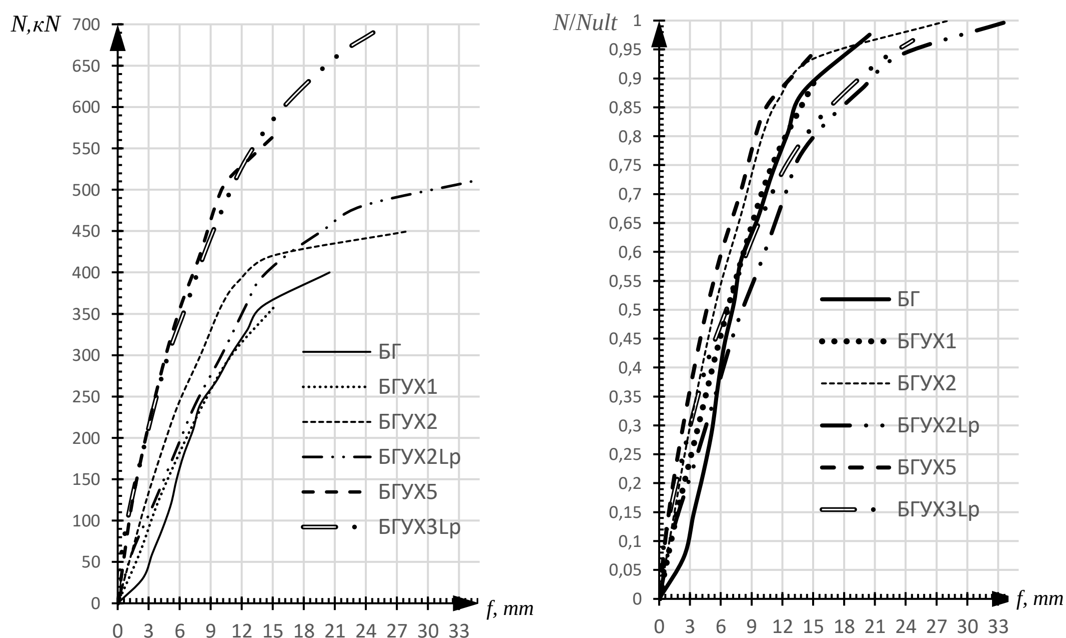



Рис. 2. Графики изменения прогибов опытных образцов при изменении уровня нагрузки (слева) и относительном уровне нагрузки $N$ / $N_{ult}$ (справа) (рисунок авторов)

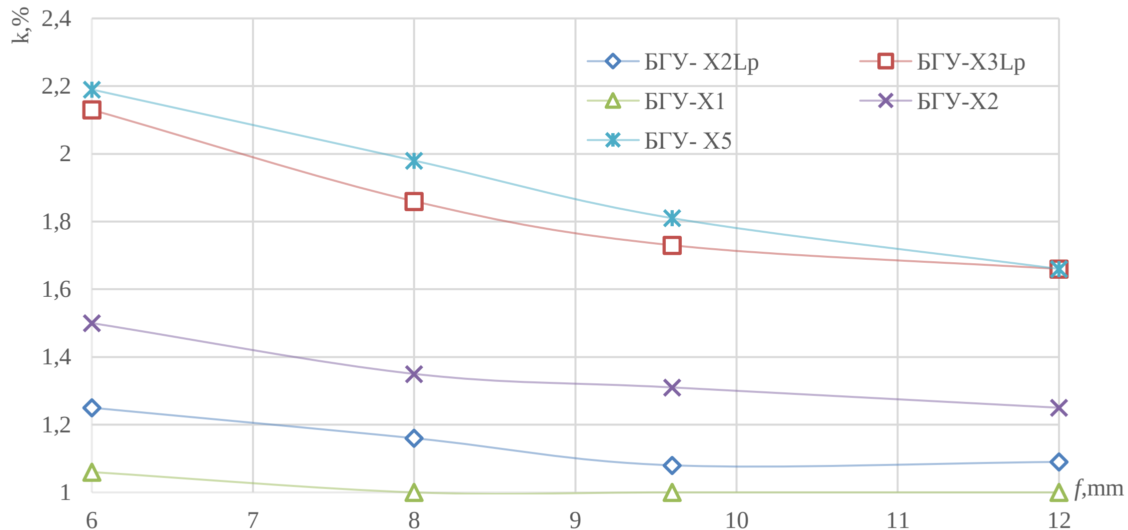



Рис. 3. Графики изменения коэффициентов усиления при предельно допустимых прогибах опытных образцов (рисунок авторов)

БГУ-Х$_1$ — железобетонная стойка, усиленная хомутами, шагом 190 мм, на приопорных участках установлены хомуты шириной 100 мм (рис. 4). Тензодатчики в основном наклеены на сжатую зону бетона. Согласно их показаниям, относительные деформации в композитных материалах изменяются от $0{,}1\times10^{-3}$ до $0{,}4\times10^{-3}$. Единственный тензодатчик, наклеенный в растянутую зону, находился в нейтральном состоянии. Его деформации не превышали $0{,}05\times10^{-3}$.

БГУ-Х$_2$ — образец усилен по аналогии со стойкой БГУ-Х$_1$, отличие заключается в том, что в центре установлен хомут шириной 240 мм (рис. 5). Тензодатчики Т10–Т14 расположены на композитных хомутах горизонтально в сжатой зоне бетона. Тензодатчики Т15 и Т16 расположены на растянутой грани в нижней части конструкции.

Относительные деформации на растянутой грани не превышали значения $0{,}05\times10^{-3}$, на сжатой — $0{,}5\times10^{-3}$–$0{,}6\times10^{-3}$. До уровня нагрузки 400 кН кривые относительных деформаций развивались по линейной зависимости, с повышением уровня нагрузки наклон кривых изменился, при этом отмечен рост значений относительных деформаций.

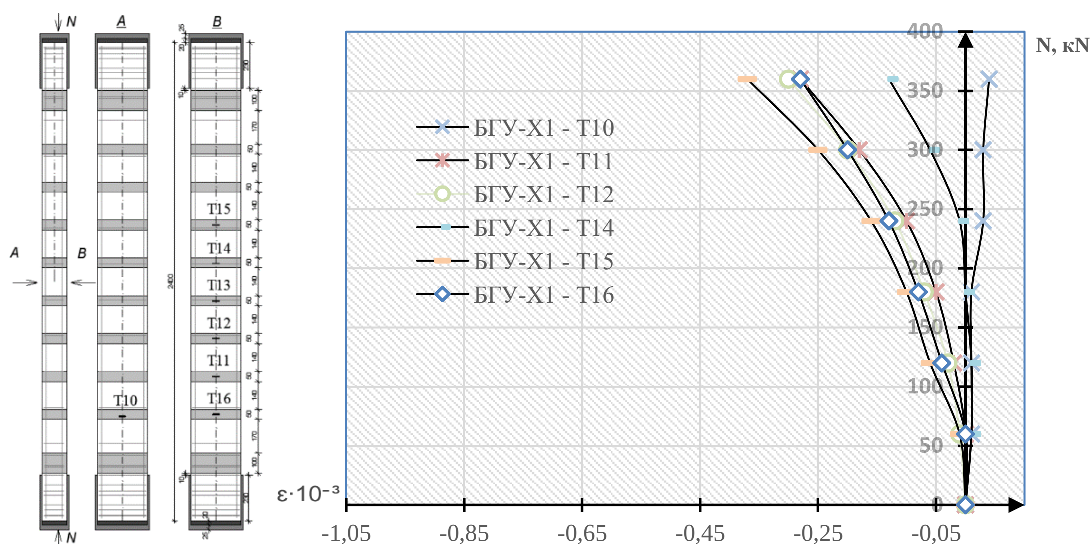



Рис. 4. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра БГУ-Х$_1$ (рисунок авторов)

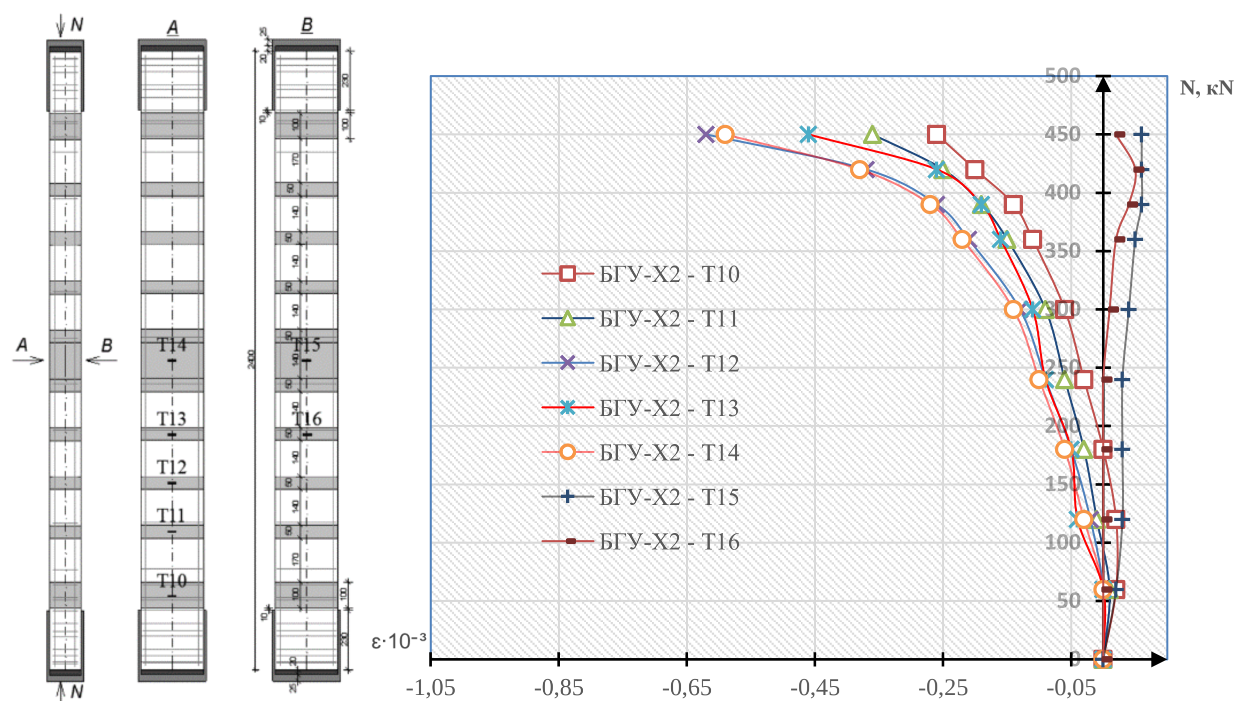



Рис. 5. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра БГУ-$X_2$ (рисунок авторов)

БГУ-$X_5$ — стойка, усиленная обоймой (рис. 6). Тензодатчики наклеены горизонтально на сжатую и растянутую грани композитной обоймы. Датчики Т1–Т8 на всём протяжении эксперимента показывали относительные деформации в пределах $0{,}01\times10^{-3}$. Тензодатчики, расположенные на сжатой грани, показывали примерно одинаковые деформации — в пределах от $0{,}2\times10^{-3}$ до $0{,}38\times10^{-3}$. На всем протяжении эксперимента наблюдались практически одинаковые линейные зависимости изменений относительных деформаций композитных материалов.

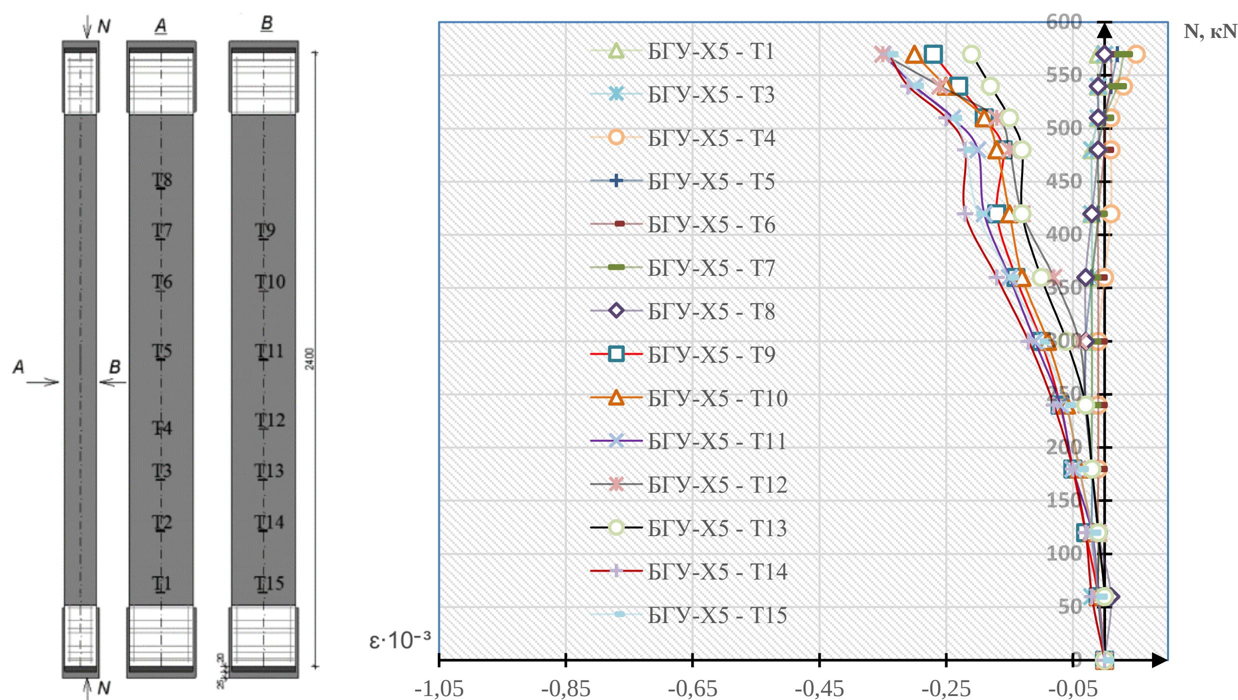



Рис. 6. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра БГУ-$X_5$ (рисунок авторов)

БГУ-$X_2L_p$ — железобетонная стойка усилена поперечными хомутами согласно варианту БГУ-$X_2$ (рис. 7). Отличие заключалось в том, что в растянутой зоне добавлены две ламели.

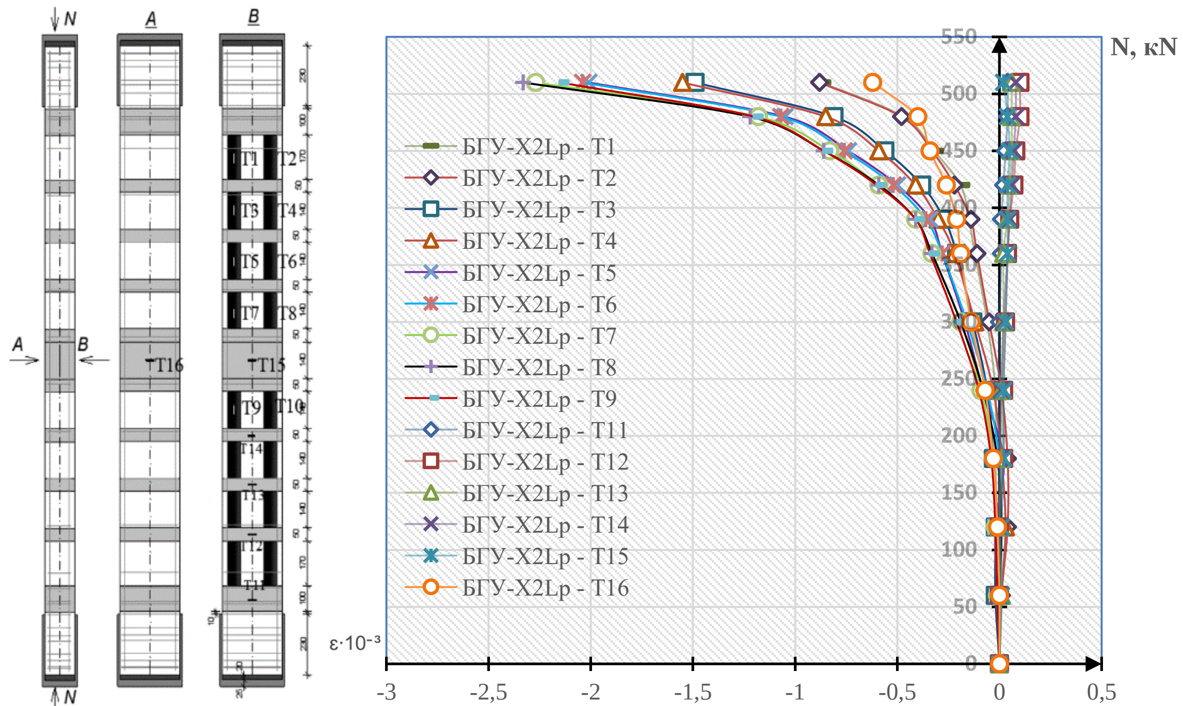



Рис. 7. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра БГУ-$X_2L_p$ (рисунок автора)

Согласно графику деформаций, тензодатчики, расположенные в растянутой зоне на хомутах, находились в пределах $0{,}05\times10^{-3}$, следовательно, влияние ламелей на изменение относительных деформаций отсутствовало.

В сжатой зоне тензодатчик Т16 показал относительную деформацию $0{,}6\times10^{-3}$. Относительные деформации в растянутых ламелях до уровня нагрузки 250 кН практически не развивались. С увеличением нагрузки до 400 кН угол наклона кривой (σ-ε) стал существенно больше, деформация в ламелях заметно увеличились. От уровня нагрузки 450 кН и вплоть до разрушения образца относительные деформации в среднем увеличились от $0{,}3\times10^{-3}$ до $1{,}9\times10^{-3}$. Наиболее растянутыми оказались ламели, расположенные между хомутами в середине стойки, а ближе к приопорным участкам деформации существенно уменьшались.

Между двумя ламелями наблюдалось равномерное распределение нагрузки, при этом предельные деформации достигали значения $2{,}3\times10^{-3}$.

БГУ-$X_3L_p$ — железобетонная стойка, усиленная полуобоймой шириной 720 мм, расположенной в центре по длине колонны (рис. 8). На приопорных участках установлены хомуты шириной 50 и 100 мм.

Тензодатчики установлены согласно схеме на поперечных хомутах, полуобойме и на композитных ламелях.

Тензодатчики, установленные на полуобойме, в растянутой зоне показали несущественные деформации, в пределах $0{,}15\times10^{-3}$. На противоположной грани тензодатчики Т10–Т12 показали предельные деформации, находящиеся в области $0{,}55\times10^{-3}$–$0{,}7\times10^{-3}$.

Наибольшее значение деформации в ламелях показали тензодатчики Т3, Т4, Т6. Относительные деформации достигали значений до $1{,}7\times10^{-3}$. Тензодатчики Т8 и Т5 в процессе эксперимента перестали работать.

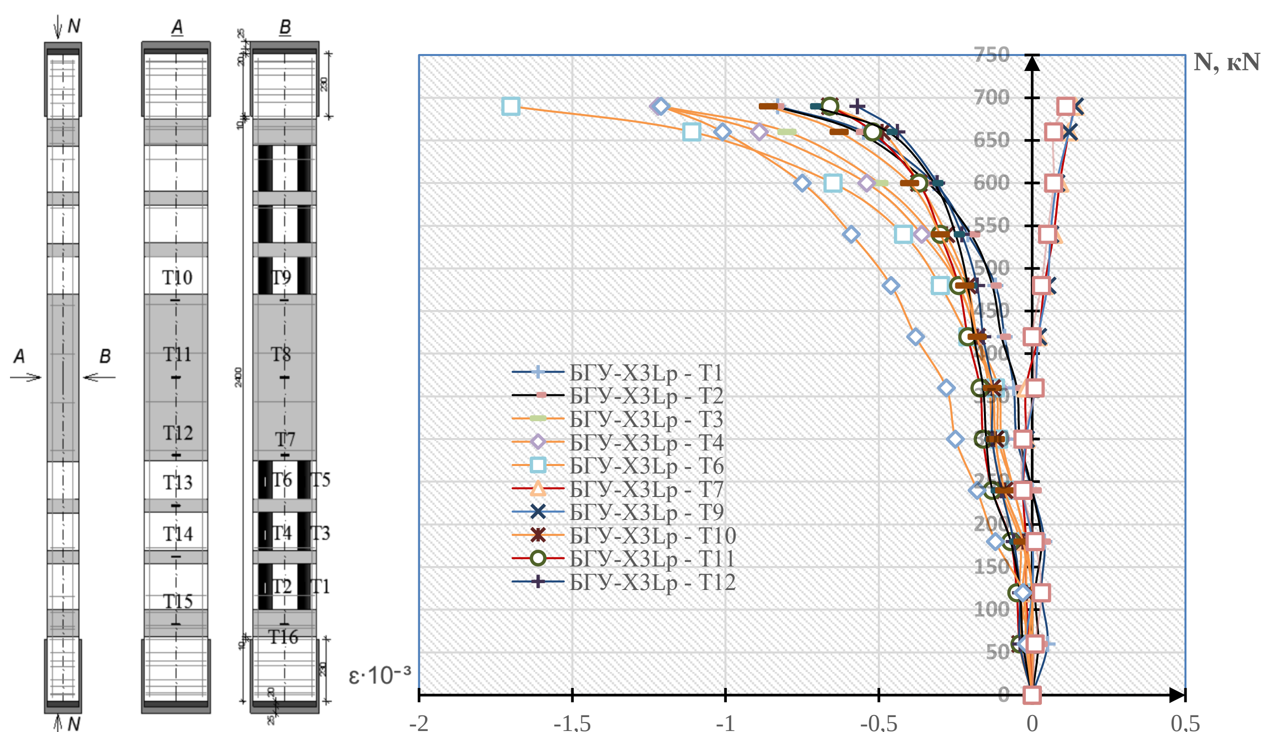



Рис. 8. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра БГУ-Х$_3$L$_p$ (рисунок авторов)

**Обсуждение и заключения.** Анализ эффективности композитного усиления для гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек будет производиться по следующим критериям:

– увеличение прочности усиленных образцов по сравнению с прочностью эталонной стойки;

– увеличение несущей способности при предельно допустимых прогибах согласно СП «Нагрузки и воздействия»;

– развитие относительных деформаций в композитных материалах.

Обработка полученных результатов экспериментальных исследований позволяет заключить следующее.

Опытный образец БГУ-Х$_1$ не показал прироста предельной прочности и предельно допустимых прогибов. Разрушение опытного образца произошло между хомутами. Тензодатчики, расположенные в растянутой зоне, показали небольшие деформации, что говорит о сильным внешнем переармировании или слабом включении материалов усиления в работу конструкции. Последнее более вероятно, так как для данного образца отсутствует увеличение несущей способности по сравнению с эталонной стойкой.

Образец, усиленный по аналогии с предыдущей стойкой, с центральным хомутом шириной 240 мм (БГУ-Х$_2$) показал прирост прочности, не превышающей 10 %, однако при предельно допустимых прогибах коэффициент усиления составил от 50 до 25 %. Анализ эффективности композитного усиления для данной стойки следует производить совместно с образцом БГУ-Х$_2$L$_p$, отличающимся по системе усиления наклеиванием двух ламелей, расположенных в растянутой зоне. Увеличение нагрузки для данной стойки составляет 24 % при предельной прочности и от 25 до 9 % предельно допустимых прогибов. Уменьшение эффективности композитного усиления, по сравнению с предыдущей стойкой, не логично. Данное несоответствие может быть вызвано особенностью проведения испытаний образцов, а именно влиянием на результаты эксперимента случайного эксцентриситета. В любом случае совместное композитное усиление, состоящее из ламелей и поперечных хомутов, дало прирост прочности, по сравнению с эталонным образцом, однако потенциал композитного усиления остается недооцененным, и данный вид армирования не рекомендуется.

Наибольший интерес вызвали результаты испытаний образцов БГУ-$X_3L_p$ и БГУ-$X_5$. Самый большой прирост прочности показал первый образец, усиленный полуобоймой с продольным композитным армированием. Коэффициент усиления составил 1,74. При предельно допустимых прогибах влияние композитного усиления варьируется от 66 до 113 % в сторону увеличения уровня нагрузки. Данный вид армирования является наиболее эффективным.

Стойка БГУ-$X_5$, согласно предельной прочности, показала 24 % увеличения нагрузки, однако при предельно допустимых прогибах увеличение нагрузки варьировалась от 66 до 119 %. Из этого можно сделать вывод, что композитное поперечное усиление влияет не на повышение прочности, а на увеличение жесткости образцов. Тензодатчики, наклеенные по всей длине конструкции, показали деформации, не превышающие $0{,}4\times10^{-3}$, что говорит о явном переармировании опытного образца. С растянутой стороны относительные деформации практически не развивались, это позволяет сделать вывод о том, что для подобных конструкций требуется меньшее количество поперечного армирования, кроме того, предоставляется возможность использования полуобоймы.

Анализ тензодатчиков для стоек БГУ-$X_2L_p$ и БГУ-$X_3L_p$ показал следующие результаты. В обеих стойках наблюдаются существенные деформации в продольном усилении. Это говорит о том, что композитные ламели полностью включаются в работу вплоть до разрушения образцов, причём с увеличением уровней нагрузки, превышающих 70 % от максимальной, включение в работу композитных ламелей становится существенно больше. Из этого можно сделать вывод, что разрушение стойки БГУ-$X_2L_p$ произошло вследствие недостаточной прочности сжатой зоны бетона. Внецентренно сжатый элемент работает по балочной схеме, с явным армированием растянутой зоны. Композитное поперечное армирование работает аналогично стойкам БГУ-$X_1$ и БГУ-$X_2$, из чего следует, что площадь поперечного сечения композитных хомутов явно переармирована.

Для образца БГУ-$X_3L_p$, относительные деформации в композитных материалах работают аналогично бегу БГУ-$X_2L_p$, как в продольном, так и в поперечном усилении.

Исходя из полученных результатов эксперимента и проведённого анализа можно сделать следующие выводы:

– расстояние в свету между хомутами, равное 140 мм, является недопустимым. При таком шаге композитного усиления отсутствует влияние композитного материала на увеличение прочности и жесткости опытных образцов. Рекомендуется ввести конструктивные ограничения на предельное расстояние между хомутами меньше 140 мм и провести ряд экспериментальных исследований по определению влияния шага композитных хомутов на увеличение эффективности композитного усиления;

– устройство хомута в центре по длине стойки не рекомендуется выполнять для увеличения прочности конструкции. Для увеличения несущей способности по второй группе предельных состояний рекомендуется выполнить дополнительные исследования;

– при проектировании поперечного усиления в виде обоймы рекомендуется использовать меньшее количество поперечного сечения композитного материала. В растянутой зоне отсутствует деформация, следовательно, необходимость устройства полной замкнутой обоймы остаётся под вопросом. Рекомендуется выполнить ряд дополнительных исследований с меньшим количеством слоёв углеткани и устройством неполной обоймы;

– при проектировании совместного композитного усиления в продольном и поперечном направлении рекомендуется производить продольное композитное армирование полуобоймой или обоймой. Анализ результатов эксперимента показал, что разрушение происходило по сжатой зоне бетона с явным

переармированием растянутой зоны. В связи с этим рекомендуется провести дополнительные исследования по увеличению несущей способности сжатой зоны бетона совместно с продольным композитным усилением в растянутой зоне.

**Библиографический список**

1. Черемных, С. В. Модель механики разрушения железобетона / С. В. Черемных // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. — 2022. — № 1 (13). — С. 28–38.

2. Клочкова, З. Ю. Применение железобетона и его преимущества, сравнительно с другими строительными материалами / З. Ю. Клочкова, А. Е. Суслова // Комплексное изучение и освоение недр Европейского Севера России : мат-лы всеросс. научно-технической конференции. — Ухта, 2021. — С. 110–112.

3. Тамразян, А. Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы / А. Г. Тамразян // Промышленное и гражданское строительство. — 2014. — № 7. — С. 51–54.

4. Аль Каради, Али. Основные физико-механические свойства железобетона / Али Аль Каради // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2013. — № 5. — С. 39–42.

5. Исследование свойств бетона железобетонных конструкций сооружений, эксплуатируемых в прибрежной зоне Черноморского побережья / В. Т. Ерофеев, Т. Ф. Ельчищева, А. И. Родин [и др.] // Транспортные сооружения. — 2018. — Т. 5, № 2. — 5 с.

6. Доломанюк, Р. Ю. Оценка состояния железобетонных конструкций для регрессивной зависимости коррозийных повреждений стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона в условиях открытой атмосферы / Р. Ю. Доломанюк // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : сб. мат-лов III Нац. науч.-практ. конф. — Омск, 2020. — С. 524–528.

7. Курбанов, З. А. Усиление сборной железобетонной колоны методом железобетонной обоймы / З. А. Курбанов, К. Е. Грушевский // Инновационное развитие: потенциал науки и современного образования : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. В 3-х ч. — Ч. 1. — 2018. — С. 169–171.

8. Хаютин, Ю. Г. Ремонт и усиление железобетонных конструкций в зданиях из монолитного железобетона / Ю. Г. Хаютин, В. Л. Чернявский, Е. З. Аксельрод // Проектирование и строительство монолитных многоэтажных жилых и общественных зданий, мостов и тоннелей : сб. док-в. — Москва, 2000. — С. 195–198.

9. Данилов, С. В. Усиление железобетонных колонн стальными обоймами / С. В. Данилов, Л. М. Фомичева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : мат-ы Междунар. науч.-техн. конф. — Могилев, 2017. — С. 240–241.

10. Муленкова, В. И. Проектирование усиления железобетонных и каменных несущих конструкций многоэтажных промышленных зданий / В. И. Муленкова, Д. В. Артюшин. — Пенза : ПГУАС, 201. — 90 с.

11. Гроздов, В. Т. Усиление строительных конструкций при реставрации зданий и сооружений / В. Т. Гроздов. — Санкт-Петербург : ООФ «ЦСК», 2005. — 114 с.

12. Яковлева, М. В. Восстановление и усиление железобетонных и каменных конструкций / М. В. Яковлева, О. Н. Коткова, В. С. Широков. — Москва : Форум : Инфра-М, 2015. — 190 с.

13. Polskoy P., Georgiev S., Muradyan V., Shilov A. The deformability of short pillars in various loading options and external composite reinforcement // Web of Conferences 2018. С. 02026.

14. Польской, П. П. Прочность и деформативность коротких усиленных стоек при малых эксцентриситетах / П. П. Польской, Д. Р. Маилян, С. В. Георгиев // Инженерный вестник Дона : [сайт]. — 2014. — № 4–1. — С. 138. — URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2734 (дата обращения: 06.12.2022).

15. Mander J.B., Priestly Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete // ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 114 No. 8. 1988, pp. 1804-1826.

16. Польской, П. П. О влиянии гибкости стоек на эффективность композитного усиления / П. П. Польской, Д. Р. Маилян, С. В. Георгиев // Инженерный вестник Дона : [сайт]. — 2015. — № 4 (38). — С. 81. — URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3374 (дата обращения: 06.12.2022).

17. Евстифеев, В. Г. Проектирование железобетонных конструкций одноэтажного промышленного здания с мостовыми кранами / В. Г. Евстифеев. — Санкт-Петербург : ПГУПС, 2016. — 63 с.

Поступила в редакцию 16.11.2022

Поступила после рецензирования 25.11.2022

Принята к публикации 30.11.2022

*Об авторах:*

**Маилян Дмитрий Рафаэлович** — профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, dmailyan868@mail.ru

**Георгиев Сергей Валерьевич** — доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, sergey.georgiev@bk.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

Георгиев С. В. — анализ результатов исследований, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. Д. Р. Маилян — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, корректировка выводов.

*Конфликт интересов*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*